

STUDY KEGAGALAN AKIBAT KOROSI PADA PIPA ECONOMIZER

Acep Wagiman ¹, Gugun Gundara ²

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Tasikmalaya
Jl. Tamansari km 2.5 Gobras, Tasikmalaya Kode pos 46196 Telp. 0265 2350982
acepwagiman@yahoo.com¹, gugun@umtas.ac.id²

ABSTRACT

Failure analysis to the economizer tube of boiler with operation pressure ± 190 bar, in holding time 6 hour have been investigated. The economizer tube is carbon steel, ASTM A210 Grade C, outside diameter ± 51 mm and thickness ± 6 mm. The investigation cause of failure from the economizer tube included : chemical composition and metallography analysis, visual examination at outer and inner fire side, measuring thickness and densities of the scale at inner fire side and wall side, chemical composition analysis of the at surface crust the economizer tube. From the results of visual investigation to both outer and inner fire side of the economizer tube shown that at fire side occur decrease thickness of the wall tube, with minimum thickness are 1.37 mm and 2,50 mm, respectively. Those caused by erosion corrosion result from effect the fly ash. Beside that, at inner fire side of the economizer tube occur light pitting corrosion result by oxygen corrosion.

Keywords : Economizer tube, boiler, fire side, fly ash, erosion corrosion, pitting corrosion, scale, oxygen

PENDAHULUAN

Economizer adalah suatu unit perpindahan panas dalam sistem boiler, yang berfungsi untuk menaikkan temperatur air umpan boiler melalui perolehan kembali (*recovery*) panas dari gas buang boiler.

Pipa *economizer* sering mengalami kerusakan, baik pada bagian luar maupun pada bagian dalam khususnya pada sisi api. Jenis-jenis kerusakan seperti *korosi erosi*, *dew-point corrosion* sering terjadi pada bagian luar sisi api pipa *economizer*, tergantung pada jenis dan kualitas bahan bakar yang digunakan serta boiler tersebut.^[4] *Dew-point corrosion* disebabkan oleh senyawa sulfurtrioksida (SO_3) yang ada dalam bahan bakar, di mana senyawa ini bersifat sangat korosif dalam kondisi tertentu.

Kerusakan pada bagian dalam sisi api seperti korosi sumuran akibat terbentuknya sel perbedaan aerasi oksigen dibawah deposit karena adanya oksigen terlarut dalam air umpan boiler, melebihi harga target (*target value*). Korosi galvanik

akibat adanya logam tembaga yang berasal dari produk korosi unit lain yang terbuat dari *copper alloy* terbawa oleh air umpan dan diendapkan pada pipa *economizer*.^[6] Pipa *economizer* tersebut dibuat dari baja karbon rendah.

Pipa *economizer* perlu diperiksa secara rutin dan periodik untuk memantau kecenderungan atau mencegah kerusakan yang mungkin bisa terjadi, baik pada sisi luar maupun dalam sisi api, hal tersebut dapat mengakibatkan *shutdown* di luar perencanaan operasi boiler.^[1, 7, 8, 10, 12]

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan jenis dan faktor – faktor yang menyebabkan kerusakan pada pipa *economizer* tersebut. Untuk itu dalam penelitian ini dilakukan berbagai pengujian dan analisis meliputi: pengujian mekanis (kekerasan) dan analisa komposisi kimia terhadap material pipa *economizer*, pengujian metalografi, pengukuran dimensi, pemeriksaan visual pada bagian luar dan dalam pipa *economizer*, pengukuran

ketebalan deposit dan kerapatan pipa *economizer*.^[4,8,11]

Dengan mengetahui jenis penyebab kerusakan akibat korosi pada pipa *economizer* tersebut maka selanjutnya dapat memberikan petunjuk dan saran – saran untuk melakukan langkah – langkah penanggulangan atau pencegahan sesuai dengan jenis dan penyebab kerusakan akibat korosi, sehingga kerusakan yang sama dapat di minimalkan dan dapat dihindari.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini pengumpulan dan pengambilan data dilakukan dengan melalui beberapa metode:

1. Data primer, yaitu data – data yang diperoleh melalui :
 - a. Observasi langsung yaitu pengambilan material pipa *economizer*, kemudian melakukan pengujian laboratorium.
 - b. Data dari laporan operasional pemakaian pipa *economizer* tersebut.
2. Data sekunder, yaitu pengumpulan data yang diperoleh dari hasil penelusuran terhadap berbagai literatur yang sesuai dengan materi penelitian.

HASIL

Untuk mengetahui identifikasi kegagalan /kerusakan pipa *economizer* telah dilakukan analisis terhadap pipa *economizer* dari unit boiler dengan tekanan 190 bar, holding time 6 jam. Pipa *economizer* terbuat dari baja karbon rendah ASTM A210 Grade C, diameter luar ± 51 mm dan tebal 6 mm. Penelitian penyebab kerusakan pipa *economizer* dilakukan melalui pemeriksaan sebagai berikut : pemeriksaan secara visual pada bagian luar dan dalam sisi api, pemeriksaan metalografi, pengujian kekerasan, analisa komposisi kimia, analisa penyebab kerusakan, meliputi ; evaluasi data hasil pemeriksaan dan pengujian, analisa terhadap dan kronologi kerusakan, dan pengujian komposisi kimia kerak korosi dipermukaan dalam tube. Pengujian dilakukan di Balai Besar Teknologi

Kekuatan Struktur (B2TKS) Puspitek Serpong.



Gambar 1. Penampang dalam pipa *Economizer*, terlihatnya las-las sambungan dan shield dalam setiap belokan

1. Kronologis Kerusakan Pipa *Economizer*.

Dalam survey di perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), telah ditemukan kerusakan pada pipa *economizer* yang digunakan pada system Boiler. Kerusakan pipa *economizer* tersebut tepatnya korosi erosi *Cold – end corrosion* atau *dew – point corrosion* akibat efek fly ash dan *Incomplete penetration* pada bagian luar sisi api pipa *economizer*, dan tergantung pada jenis dan kualitas bahan bakar yang digunakan serta kondisi boiler tersebut.

Sehingga pipa *economizer* tersebut tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Untuk lebih jelasnya ditunjukkan pada Gambar 2 dan gambar 3 yang memperlihatkan penampang yang terkena kerusakan akibat serangan korosi.



Gambar 2. Potongan tube boiler/*economizer* yang mengalami korosi dan terjadi penipisan dinding pipa.



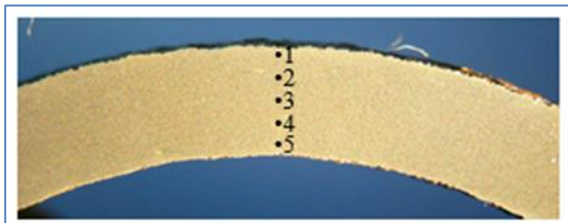
Gambar 3. Hasil proses las pada *tube Economizer* yang kena korosi dan *incomplete penetration*

2. Pemeriksaan Visual.

Pipa *economizer* yang mengalami kegagalan/kerusakan pada bagian luar maupun pada bagian dalam khususnya pada sisi api. Untuk lebih jelasnya ditunjukkan pada Gambar 2 yang memperlihatkan penampang kerusakan akibat korosi erosi. Sedangkan Gambar 3 memperlihatkan kerusakan akibat *Incomplete penetration* pada sisi luar dan dalam pipa.

3. Pengujian Kekerasan.

Pengujian kekerasan dilakukan pada material pipa *economizer* yang korosi dengan menggunakan metode Hardness Vickers (HV) dan hasil kekerasan ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2. Dengan posisi pengujian mengambil 5 titik pada penampang pipa *economizer* yang korosi yaitu titik 1, 2, 3, 4, 5 sehingga setelah di rata – rata nilai kekerasannya diharapkan akan lebih akurat.



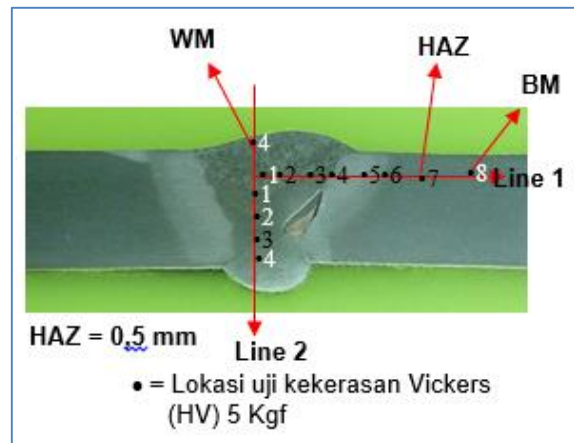
Gambar 4. Titik Lokasi Uji Kekerasan

Tabel 1. Hasil uji kekerasan 1 Tube Boiler

No	NILAI KEKERASAN, HV
1	152
2	152
3	153
4	152
5	151
Rata - rata	152

Data alat uji kekerasan Vickers:

Nama alat : Frank Finotest
 Metode Uji : Hardness Vickers (HV)
 Beban (P) : 5 Kgf
 Sudut Identor : 136°
 Waktu Uji : 15 detik
 Temperatur Uji: 28 °C
 Standar Uji : SNI 19-0409-1989



Gambar 5. Lokasi Uji Kekerasan Vickers

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan 2 Vickers (HV) P = 5 Kgf

No	NILAI KEKERASAN HV	
	Line 1	Line 2
1	175 HV	192 HV
2	175 HV	190 HV
3	241 HV	181 HV
4	241 HV	158 HV
5	232 HV	153 HV
6	232 HV	
7	218 HV	
8	181 BM	

Spesifikasi alat uji kekerasan Vickers:

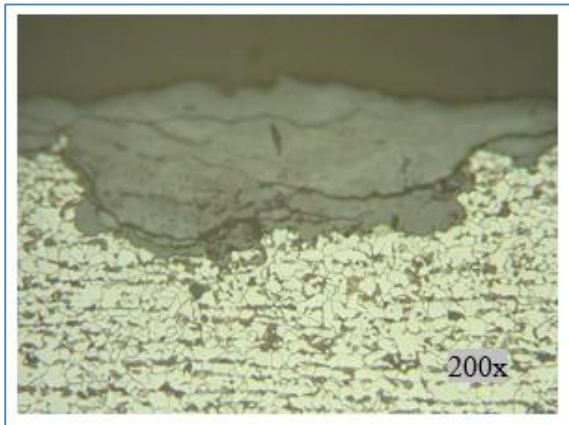
Nama alat : Frank Finotest
 Metode Uji : Hardness Vickers (HV)
 Beban (P) : 5 Kgf
 Sudut Identor : 136°

4. Analisa Kimia dan Metalografi

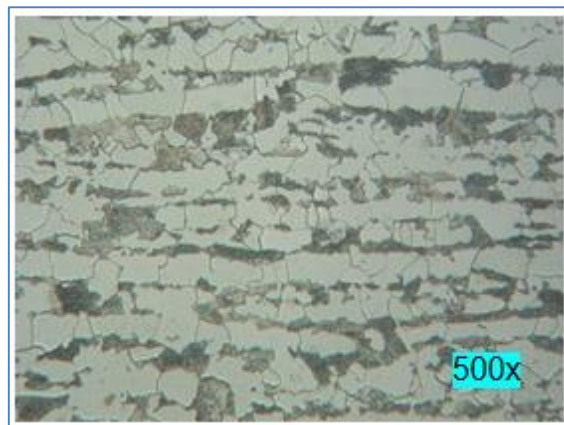
Analisa komposisi kimia dilakukan pada material pipa *economizer* korosi menggunakan *Arc-Spark Spectrometer*. Pengujian komposisi kimia ini dilakukan pada pipa *economizer*, sehingga hasil pengujian ini diharapkan lebih akurat. Hasil pengujian tersebut bisa dilihat pada Tabel 3. Hasil pengujian komposisi kimia

Tabel 3. Hasil pengujian komposisi kimia

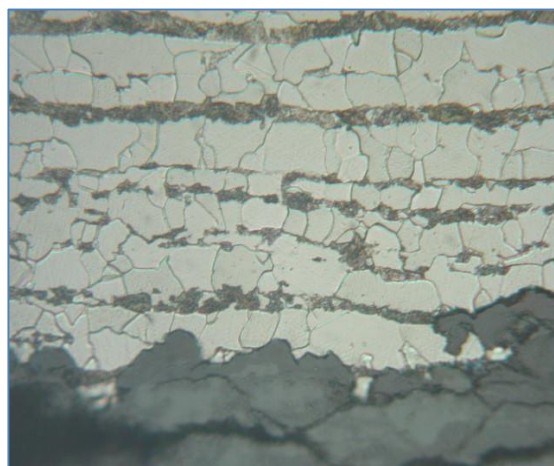
No.	Unsur	Kandungan unsur (% berat)
		TUBE
1	Fe	98.40
2	C	0.195
3	Si	0.221
4	Mn	0.92
5	Cr	0.088
6	Ni	0.047
7	Mo	0.0163
8	Cu	0.065
9	Al	0.0075
10	V	0.0013
11	W	0.0005
12	Ti	0.0165
13	Nb	0.0014
14	B	0.00
15	S	0.0031
16	P	0.0078



Gambar 6. Struktur mikro metallografi potongan memanjang (lokasi 1) diameter luar berupa ferit (putih) - perlit (hitam) dan mengalami serangan korosi menyeluruh pada diameter luar dan dalam. Etsa: nital 2%



Gambar 7. Struktur mikro metallografi potongan memanjang (lokasi 2) berupa ferit (putih) - perlit (hitam). Etsa: nital 2%



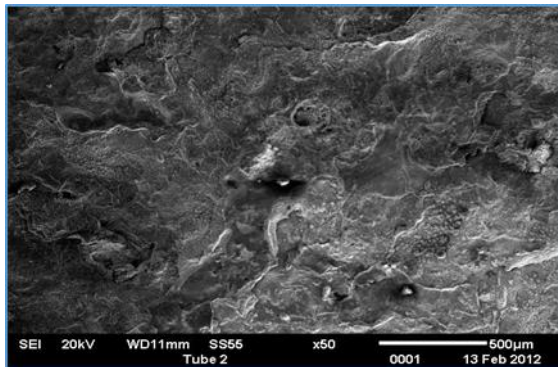
Gambar 8. Struktur mikro metallografi potongan memanjang (lokasi 3) diameter dalam berupa ferit (putih) - perlit (hitam) dan mengalami serangan korosi menyeluruh. Etsa: nital 2%

Dari hasil analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa pipa *economizer* terbuat dari baja karbon rendah, yang termasuk spesifikasi ASTM A210 Grade C. [3, 5, 13]

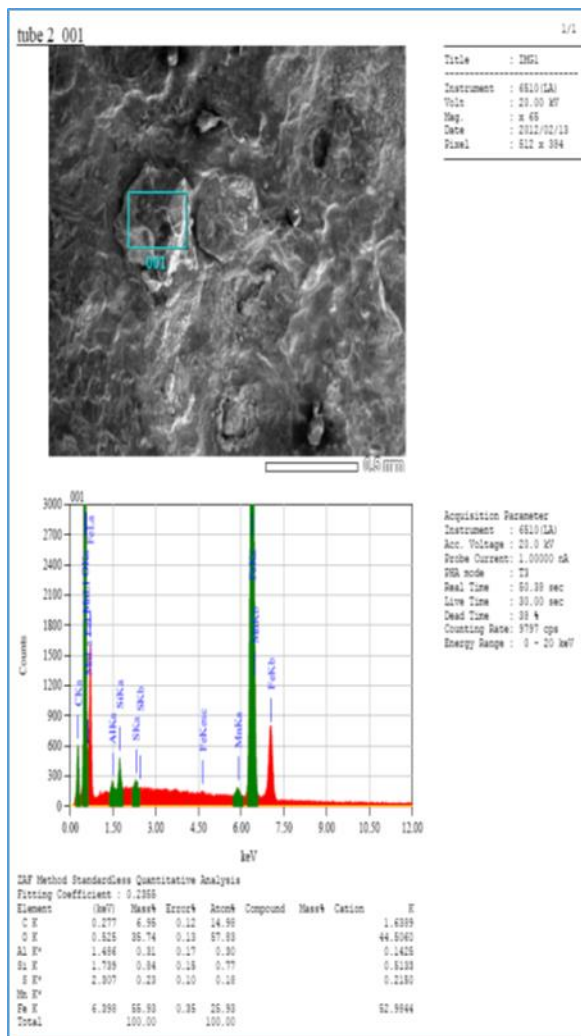
5. Analisa Komposisi Kimia Kerak Dipermukaan Pipa.

Pemeriksaan komposisi kimia dari kerak dipermukaan dalam pipa dilakukan dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). SEM dilengkapi dengan alat *energy dispersive x-ray analyzer* (EDAX) berfungsi untuk mengetahui

komposisi deposit pada lokasi yang mengalami kerusakan.



Gambar 9. Foto permukaan electron icroscope tube 2 (perbesaran sampai 200x)



Gambar 10. Grafis analisa kualitatif kimia korosi (perbesaran 65x)

Dari gambar 9 dan 10 terlihat bahwa bentuk serangan korosi cenderung sama,

disana –sini terdapat bongkahan korosi dengan alur retak yang bersifat lameran.

Hasil pengujian terhadap komposisi kimia produk korosi yang terjadi pada titik sample pipa, diperlihatkan dalam bentuk analog dan digital, seperti yang terlihat pada gambar 10. [9]

PEMBAHASAN

Pembahasan kerusakan akibat korosi pada pipa *economizer* ini akan diawali dengan suatu tinjauan hasil pengukuran dimensi pipa dan beberapa hasil uji yang dianggap sebagai factor-factor pendukung untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan pada pipa *economizer* serta suatu rencana disain dan pemeliharaan yang dapat mengantisipasi kejadian yang sama.

Untuk pipa *economizer* ; mekanisme air, korosi jenuh dan korosi kecepatan aliran secara umum menjadi perhatian utama. Kekuatan pipa mungkin juga dipengaruhi oleh mekanisme gas berkaitan dengan kotoran abu, saluran air dan korosi titik embun asam.

Panas berlebih dan mekanisme yang berhubungan, dimana yang menjadi perhatian utama untuk dinding air dan pipa SH/RH, jarang menjadi perhatian pada pipa *economizer*.

Jarak pipa yang padat selalu membuat akses terbatas pada kebanyakan inspeksi permukaan pipa,. Penerapan teknologi baru dan pemahaman yang baik terhadap mekanisme kerusakan sangat membantu untuk ngurangi frekuensi kesalahan pipa *economizer*. Teknik perbaikan/ pemeliharaan yang baru sangat mengurangi biaya dan lama pengerjaan. [1, 5, 6]

1. Pengembangan pemeliharaan yang harus dilakukan.

- 1) Proses scanning menggunakan electromagnetit transducer, test eddy current, respon infra merah aktif dan teknik lain beberapa kemampuan untuk mendeteksi secara cepat semua perubahan ketebalan dan kerusakan lain di area pipa.

- 2) Perlengkapan radiografi portable digital (plat radiografi pospor digital) adalah menyediakan peningkatan resolusi dan/atau mengurangi kekuatan sumber (dengan zona pengeluaran minimal) dibandingkan dengan film tradisional berdasarkan radiografi.
- 3) Perlengkapan ukuran kecil yang serbaguna sediakan untuk memudahkan akses kedalam area pipa.
- 4) Melapisi dengan las, penyemprotan dan pelindung non metal telah menunjukkan tingkat keberhasilan untuk mengurangi pengikisan dan korosi,
- 5) Sistem las otomatis digunakan untuk perbaikan pipa dan penggantian EPRI telah terlisensi sebagai sebuah system untuk pipa dinding air dan pekerjaan tambahan berlanjut.
- 6) Pengamatan secara continue pemurnian test kecapatan air dingin dan menggunakan alat kontrol aliran untuk mendistribusikan kembali dan mengurangi pengikisan. [10, 11, 12]

2. Mekanisme kerusakan untuk pipa *economizer*

Karena potensi mekanisme kerusakan sangat besar untuk pipa *economizer*, sangat mendasar bahwa identifikasi yang membuat mekanisme spesifik menghasilkan kerusakan pipa atau menyebabkan kerusakan sebelumnya. Saat identifikasi benar dilakukan, akar masalah dapat diketahui, dengan langkah identifikasi bahwa bisa memperlambat atau menghilangkan kerusakan.

3. Pemeriksaan Visual pada bagian dalam Pipa *Economizer*.

Pemeriksaan secara visual bagian dalam sisi api pipa *economizer* sebelum deposit dibersihkan, gambar 2 menunjukan adanya ongkongan – ongkongan (*tubercles*) dari produk korosi Fe_2O_3 (*hematite*), yang berwarna kemerah – merahan dan *porous*. Ini mengindikasikan adanya korosi sumuran dibawah produk korosi tersebut. Pada sisi

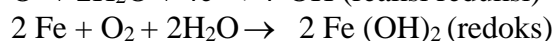
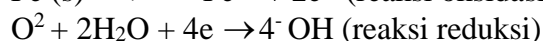
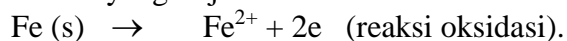
dinding lapisan depositnya berwarna hitam ke abu – abuan yang berasal dari lapisan F_3O_4 (*magnetit*) dan tidak ada tubercles. Dan dari hasil pengamatan visual pada

kedua sisi api bagian luar dan dalam pipa *economizer* menunjukan bahwa pada sisi luar terjadi penipisan dinding masing-masing dengan ketebalan minimum 1,37 mm dan 2,51 mm ini disebabkan oleh korosi erosi akibat *fly ash*. Sedangkan pada bagian dalam sisi api pipa *economizer* terjadi korosi sumuran ringat akibat *oxygen corrosion*. [4, 5, 8]

4. Pengujian Metalografi.

Struktur mikro hasil pengujian metalografi pada beberapa titik di daerah sekitar korosi ditunjukan pada gambar 2 dan 3. Pada lokasi 1, gambar 4 dan gambar 5, merupakan daerah luar dan dalam sesuai gambar, dimana pada sebelah kanan luar nampak daerah hitam yang merambat seperti akar yang merupakan *general corrosion* atau korosi merata, ini terjadi adanya pengaruh lingkungan laut adalah lingkungan yang paling rentan terhadap korosi sehingga yang berlangsung mengakibatkan seluruh permukaan tersebut menjadi kasar dan timbul tegangan permukaan dan ini terjadi biasanya material selagi ada di *storage material*. Secara teknik korosi merata tidak berbahaya karena laju korosinya dapat diketahui dan diukur dengan ketelitian tinggi. Kegagalan material akibat serangan korosi ini dapat dihindari dengan pemeriksaan dan monitoring secara teratur. Korosi pada logam terjadi karena adanya reaksi redoks antara logam dan lingkungannya. Korosi merata berlangsung secara lambat dan korosi ini dipicu oleh korosi yang mula – mula terjadi pada sebagian permukaan sehingga dengan bertambahnya waktu akan menyebar keseluruh ke permukaan logam. Korosi yang terjadi pada logam besi prosesnya bisa dilihat dibawah ini :

Reaksi yang terjadi adalah :



Laju korosi dapat diturunkan dengan perlindungan melalui penambahan inhibitor pada larutan. Teknik – teknik perlindungan seperti proteksi katoda dan anoda, pelapisan, inhibitor dan pemilihan material sering digunakan sebagai cara perlindungan korosi paling efektif.

Pengetahuan mengenai karakteristik korosi dan laju korosi pada logam dan panduan logam sebagaimana ditunjukkan dalam literatur atau yang diukur melalui teknik elektrokimia ataupun melalui pengurangan berat logam memungkinkan dilakukannya pemilihan material yang baik. Cara terbaik untuk menghindari terjadinya korosi merata adalah dengan melakukan penanganan langsung pada bagian logam yang terkorosi sebelum korosi ini menyebar ke semua permukaan logam.

Pada lokasi 2 dan lokasi 3 terjadi hal sama korosi menyeluruh, untuk mengetahui struktur mikro baja karbon terlihat jelas yang terdiri struktur ferit yang berwarna putih sedang yang perlit berwarna hitam, sehingga pada bagian dalam sisi api pipa *economizer* terjadinya korosi sumuran ringan, korosi sumuran merupakan korosi yang muncul dan terkonsentrasi pada daerah tertentu. Bentuk korosi tersebut disebabkan oleh klorida atau akibat oxygen corrosion. Mekanisme terbentuknya korosi sumuran sama dengan korosi celah, hanya saja korosi sumuran ukurannya lebih kecil jika dibandingkan dengan korosi celah. Karena jaraknya yang saling berdekatan satu sama lain, korosi sumuran akan mengakibatkan permukaan logam akan menjadi kasar. Korosi sumuran terjadi karena komposisi material yang tidak homogen, rusaknya lapisan pelindung, adanya endapan dipermukaan material, serta adanya bagian yang cacat *Incomplete penetration* pada material.

Sedangkan pada sisi luar terjadi penipisan dinding pipa, ini disebabkan oleh korosi erosi akibat efek *fly ash*. Korosi erosi merupakan gabungan dari kerusakan elektrokimia dan kecepatan fluida yang tinggi pada permukaan logam. Korosi erosi dapat juga terjadi karena adanya aliran

fluida yang sangat tinggi melewati benda yang diam dan statis. Atau bisa juga terjadi karena sebuah objek bergerak cepat di dalam fluida yang diam.

Bagian permukaan logam yang terkena korosi biasanya relatif lebih bersih jika dibandingkan dengan permukaan logam yang terkena korosi jenis lain. Erosi korosi dapat dikendalikan dengan menggunakan material yang terbuat dari logam yang keras, merubah kecepatan alir fluida atau merubah arah aliran fluida.

Beberapa senyawa seperti yang diuraikan di atas dapat menimbulkan serangan korosi pada pipa, khusus pada daerah lasan terdapat serangan korosi jenis pitting korosi akibat dari *incomplete penetration*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada saat pengelasan berlangsung di daerah HAZ yang merupakan daerah transisi mengalami distribusi temperatur yang tidak merata sehingga mempengaruhi struktur mikro (besar butir) dari materialnya atau terjadi ketidak homogenan ukuran dari butiran dimana hal ini mengakibatkan ada butir yang mengalami pelunakan. Pada daerah lasan dapat mencapai 1400 °C (*cast*) sedangkan pada daerah HAZ di bawah 732 °C (*softening*). Pada daerah *softening* biasanya struktur butirannya kasar/besar (perlit) dimana daerah batas butirnya banyak terdapat atom-atom karbida yang mudah diikat oleh oksigen/hidrogen sehingga terjadi pelemahan dan akhirnya mudah terserang korosi (ketidakstabilan energi mengakibatkan kelemahan sehingga mudah terserang). Hal ini dapat dicek melalui uji kekerasan dimana pada daerah HAZ yang struktur butirnya kasar kekerasannya lebih rendah.^[3,8,10,12]

5. Pengujian Kekerasan.

Pengujian kekerasan terhadap penampang yang terkena korosi dilakukan pada 5 titik. Hal ini dimaksudkan untuk mencari nilai kekerasan yang lebih akurat dari penampang potongan pipa *economizer* yang terkena korosi. Pengujian kekerasan menggunakan vickers dan hasil pengujiannya bisa dilihat di tabel 2. Dan

nilai kekerasan potongan pipa *economizer* hampir merata, setelah dirata – rata dari 5 titik hasil pengujian maka nilai kekerasan potongan pipa *economizer* adalah 152 HV. Sedangkan nilai kekerasan pada materail standar ASTM A210 Grade C adalah 179 HB/HV. Sehingga dari perbandingan tersebut maka material potongan pipa *economizer* yang terkena korosi nilai kekerasannya relatif lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan material standar ASTM A210 Grade C. Hal ini kemungkinan karena pengaruh dari material *economizer* korosi yang tidak homogen atau komposisi kimia yang kurang sesuai standar. Dan jika ditinjau hasil uji komposisi kimia maka kadar karbonnya lebih rendah dari kadar karbon material standar yang akan berakibat terhadap nilai kekerasan material menjadi rendah. [8, 10, 12]

6. Analisa Komposisi Kimia.

Pengujian komposisi kimia dilakukan pada material pipa *economizer* yang akan dipakai dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 2-3. Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa material pipa *economizer* tersebut mendekati spesifikasi material standar ASTM A210. Hal ini bisa dilihat dari hasil uji komposisi kimia, dimana kandungan karbonnya sebesar 0,195% C. Kemudian hasil uji komposisi kimia ini bisa dibandingkan dan dianalisa terhadap komposisi standar ASTM A210 Grade C sebagai berikut :

1. Unsur karbon (C) pada material pipa *economizer* (0,195 % C) sedangkan pada standar ASTM A210 Grade C yaitu (0,27 %C) sehingga masih lebih rendah 0,075%. Hal ini mengakibatkan penurunan pada nilai kekerasan material potongan pipa *economizer* yang terkena korosi.
2. Unsur silikon (Si) pada material *economizer* (0,221 % Si) sedangkan pada material standar ASTM A210 Grade C (0,10 %Si), jadi unsur silicon (Si) pada material *economizer* tinggi dibandingkan standarnya. Sehingga ketahanan material terhadap scaling lebih kuat dan

rangsangan terbentuknya fasa ferit juga lebih kuat.

3. Sulfur (S) pada material *economizer* (0,0031 %S) sedangkan pada materail standar ASTM A210 Grade C (0,035 %S), sehingga dengan rendahnya unsur sulfur (S) pada material *economizer* menjadi berkurang sifat mampu pipa *economizer*.
4. Unsur manganese (Mn) pada material *economizer* (0,92 %Mn) sedangkan pada material standar ASTM A210 Grade C (0,29-1,06 %Mn), sehingga dengan rendahnya unsur manganese (Mn) pada material *economizer* maka stabilitas feritnya pada temperatur tinggi kurang.
5. Unsur phosphorus (P) pada material *economizer* (0,0078 %P) sedangkan pada material standar ASTM A210 Grade C (0,035 %P), sehingga dengan rendahnya unsur phosphorus (P) pada material *economizer* dapat menurunkan keuletan dari material.
6. Selain itu pada material *economizer* juga terdapat unsur – unsur yang tidak dimiliki oleh material standar ASTM A210 Grade C seperti Cr, Ni, Mo, Cu, Al, V, W, Ti, Nb, B yang prosentasenya kurang dari 1 %, kemungkinan berasal dari proses casting, machining atau fabrikasi. [3, 4, 5]

KESIMPULAN

Dari hasil pemeriksaan, pengamatan, pengukuran dan analisa kimia dapat disimpulkan, penyebab kerusakan pipa *economizer* pada bagian luar sisi api yang diakibatkan oleh korosi erosi tergolong sangat parah karena ketebalan optimum pipa pada posisi 1,37 dan 2,51mm sedangkan batas ketebalan minimum pipa 2,54 mm dan ketebalan rata-rata pada sisi dinding terukur 4,56 mm.

Pada bagian dalam sisi api pipa *economizer* terbentuk tubercles besi oksida Fe_2O_3 (*hematite*) dan adanya sedikit korosi sumuran yg merupakan ciri khas dari kegagalan akibat *oxygen corrosion*, sedangkan pada sisi dinding seluruh permukaannya tertutup oleh lapisan proktektif Fe_3O_4 (*magnetite*).

Kerusakan pipa *economizer* pada bagian dalam sisi api yang diakibatkan oleh oxygen corrosion masih tergolong ringan karena kedalaman sumuran maks. 0,0519 mm. Dan kerusakan akibat korosi yang terjadi pada pipa *economizer* tersebut disebabkan oleh salah satu atau kombinasi dari faktor-faktor:

1. Dari hasil analisa komposisi kimia, diperoleh bahwa material pipa *economizer* tersebut termasuk material standar baja karbon rendah tetapi kadar karbonnya 0,195 %C lebih rendah dari standar ASTM A210 Grade C yaitu 0,27 %C.
2. Ditinjau dari hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa material pipa *economizer* tersebut nilai kekerasan rata-ratanya adalah 152 HV, maka relative lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan material baja karbon standar ASTM A210 Grade C yaitu 179 HV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ALSTOM Power Inc. 2006. *Boiler and Environmental Plant Services Division Operation and Maintenance*. East Kentucky Power Cooperative, Gilbert Unit 3.
- [2]. *American Society of Mechanical Engineer*, January 1998.
- [3]. D,N. Adnyana, *Struktur dan Sifat Mekanis Material Logam*, Diktat Mata Kuliah Program Pasca Sarjana (S2) ISTN Jakarta, 2003.
- [4]. French, David N. 1983. *"Metallurgical Failure in Fossil Fired Boilers"*. New York: John Wiley & Sons.
- [5]. George E.Dieker, *Metalurgi Mekanik*, Erlangga, Jakarta, 1992.
- [6]. Kurita. 1985. *"Water Industries Ltd"*. Kurita Hand Book Water Treatment.
- [7]. Lane, Russel W. 1993. *"Control of scale and corrosion in Building Water System"* Mc. Grow-Hill, Inc.
- [8]. Mars. G Fontana. Regents "Corrosion Engineering" Professor And Chairman Emeritus Department of Metallurgical Engineering Fontana Corrosion Center The Ohio State University., McGarw-Hill Book Company Third Edition 1987.
- [9]. Port, Robert D. and Harvey M. Herro, 1991. *"The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis"* Mc. Grow-Hill, Inc.
- [10]. Sri Widiarto, Karat dan Pencegahannya, Pradnya Paramita, Jakarta 1999
- [11]. The Babcock & Wilcoc Company, Barberton, Ohio, U.S.A. 1992. "Steam/its generation and use, 40th edition" Editor: Steven C. Stultz and John B. Kitto.
- [12]. Uhlig. 1991. *"Corrosion and Corrosion Control"* 3nd. Singapore :John Wiley & Sons.
- [13]. W.O. Alexander, *Dasar Metalurgi untuk Rekayasawan*, Gramedia, Jakarta.